

상천이 필터를 이용한 싸이클로컨버터 출력의 개선

김종수¹ · 서동환² · 김정우³ · 김성환[†]

(원고접수일 : 2012년 12월 4일, 원고수정일 : 2013년 1월 4일, 심사완료일 : 2013년 1월 17일)

An improvement of cycloconverter output using phase shifting filter

Jong-su Kim¹ · Dong-hoan Seo² · Jeong-woo Kim³ · Sung-hwan Kim[†]

요약: 교류기기의 속도 및 토크 제어시스템에서 전력변환장치로 사용되는 싸이클로컨버터는 저속에서 토크가 크고 제어가 간단한 장점을 가지고 있다. 또한, 정류기, 직류링크부, 인버터가 설치되지 않으므로 시스템이 간단하고 대전력 시스템에 적합하다. 현재 사용되고 있는 대형선박의 추진전동기의 구동용 전력변환장치를 싸이클로컨버터로 변경하면 시스템이 간단해지므로 설치비용을 크게 감소시킬 수 있다. 하지만 기존의 싸이클로컨버터는 전력 반도체소자의 고속 스위칭에 의한 손실이 크고 출력 전압파형이 왜곡되어서 고조파 성분이 증가하게 된다. 본 논문에서는 이러한 단점을 개선하기 위해서 1차측에 위상이 다른 2개의 입력단과 2차측에 1개의 출력단으로 구성되는 상천이 필터를 설치한다. 위상이 다른 2개의 전압파형이 더해져서 2차측으로 변압됨으로써 전압파형이 정현파에 가깝게 출력된다. 그로 인해 추진전동기에 입력되는 전압파형이 개선되고 총고조파왜형률도 크게 감소한다.

주제어: 전력변환장치, 싸이클로컨버터, 상천이 필터, 총고조파왜형률

Abstract: Cycloconverter used as a power conversion device in the speed and torque control system of AC machines has the advantage of a simple control and a large torque at low speed. In addition, because a rectifier, a DC link, and an inverter are not installed, this system is simple and suitable for large power system. If a power conversion device, which is currently used as a propulsion motor of large vessel, is changed into cycloconverter, the system is simplified and then the installation costs can be significantly reduced. However, conventional cycloconverter has the increased harmonics because the power loss is large and the waveform of output voltage is distorted, due to the high-speed switching of power semiconductor devices. In order to improve these shortcomings, this paper describes a phase shifting filter which is composed of two inputs with different phases in the primary side and one output in the secondary one. As the voltage waveforms with two different phases are added and transformed into the secondary side, these outputs are close to sinusoidal waves. Thereby the voltage waveforms, which are applied to the propulsion motors, are improved and total harmonic distortions (THDs) are significantly reduced.

Keywords: Power conversion device, Cycloconverter, Phase shifting filter, Total harmonic distortion (THD)

† 교신저자: (606-791) 부산광역시 영도구 태종로 727

한국해양대학교 기관시스템공학부, E-mail: kksh@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4265

1 한국해양대학교 기관시스템공학부, E-mail: jongskim@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4831

2 한국해양대학교 전기전자공학부, E-mail: dhseo@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4410

3 동양대학교 전자유도기술학과, E-mail: jwkim@dyu.ac.kr, Tel: 054-630-1110

1. 서론

교류기기의 대부분이 주파수 제어를 통해서 속도와 토크 제어가 이루어진다. 이를 위해서는 교류를 직류로 변환한 후 다시 원하는 교류 주파수로 변환하는 방식을 많이 사용하고 있는 추세이다[1][2]. 이러한 시스템은 많은 설비가 필요하며 복잡하고 고가이다. 최근에는 대전력 시스템에서 고조파 제거를 위해서 변압기를 이용해 출력 펄스를 증가시키는 경우와 별도의 전원을 추가로 공급하는 방식 등이 연구되고 있다. 그로 인해 전력시스템 자체의 제작 단가가 상승하고 시스템 자체도 복잡해지고 있다[3]. 이러한 교류-직류-교류 변환 방식의 단점을 해소하기 위해서는 교류-교류 변환 방식의 사이클로컨버터를 이용할 수 있다. 하지만 기존의 사이클로컨버터를 사용하는 전력변환방식은 출력 전압파형이 일그러지고 복잡한 고조파 성분을 포함하고 있으므로 많은 문제점을 초래한다. 이러한 문제점 중에서 고차 고조파는 필터를 이용하여 제거할 수 있으나 저주파수의 고조파 성분은 전력 손실과 토크 리플을 발생시킨다[1][2]. 기존 방식의 사이클로컨버터 전력변환장치 출력의 고조파를 제거하기 위해서는 펄스 수를 증가 시키고 순환전류를 이용해야 한다. 특히, 펄스 수를 증가시키기 위해서는 고속 스위칭 장치와 복잡한 제어시스템이 필요하므로 출력 손실이 증가하여 효율이 감소하는 단점을 가지고 있다[4].

본 논문에서는 기존의 사이클로컨버터의 단점을 해결하기 위해서 상천이 필터를 설치하여 교류-교류 전력변환장치의 출력 파형을 개선하고자 하였으며 특히, 저속으로 운전되는 대형선박의 추진전동기의 속도 및 토크제어에 이용하는 것에 주안점을 두었다. 제안하는 방식은 사이클로컨버터 출력 단에 2개의 입력과 1개의 출력을 갖는 변압기를 이용하는 필터를 설치하며 2개의 변압기 1차 측 입력에 출력파형에 맞는 위상차를 두어 2차 측의 출력파형을 보다 정현파에 가깝게 개선하고 총고조파왜형률도 감소시킨다. 또한, 변압기를 이용하여 전력변환장치와 전동기를 전기적으로 절연할 수도 있다.

2. 사이클로컨버터

사이클로컨버터는 어떤 주파수의 교류전력을 다른

주파수의 교류전력으로 직접 변환하는 장치이며 선박에 적용 시에는 주로 교류전동기인 동기전동기 및 유도전동기의 주파수 변환장치로 사용하여 전동기의 속도를 제어한다. 사이클로컨버터의 구조상 가장 큰 특징은 직류 링크 단이 없는 것과 정류장치가 필요하지 않다는 것이다.

Figure 1은 6펄스 회로의 3상 사이클로컨버터이며 3개의 유니트로 구성되어 있다. 각 유니트는 두개의 3상 전파 SCR 또는 IGBT 브릿지 회로로 구성되어 있다. 이들은 대전력이 사용되는 전력시스템에서 고속 스위칭과 대전류 공급을 위해서 이용된다. 하나는 양의 방향으로 전류를 도통시키고, 다른 하나는 음의 방향으로 전류를 도통시킨다.

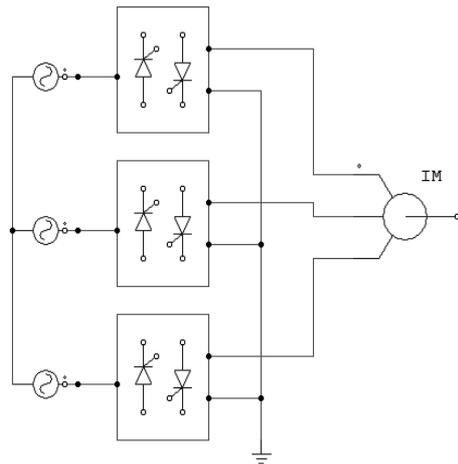


Figure 1: Schematic of cycloconverter

Figure 2는 기존의 사이클로컨버터를 이용한 전력변환장치의 출력전압 파형을 나타낸 것이다. 파형의 모양이 정현파가 되지 못함을 볼 수 있다. 사이클로컨버터는 저속에서 토크가 크고 제어가 간단하다는 장점을 가지고 있으나, 반면에 많은 전력소자를 사용함으로써 복잡한 개폐회로를 가지며 전력소자의 게이트 펄스 수가 증가하므로 스위칭에 의한 전력손실이 크고 출력에 큰 고조파가 발생하는 단점이 있다[1][2]. 그러므로 전력변환장치 출력 전압파형의 개선과 고조파 함유율을 감소시킨다면 교류기기 속도 및 토크제어 시스템으로 사용이 가능하다.

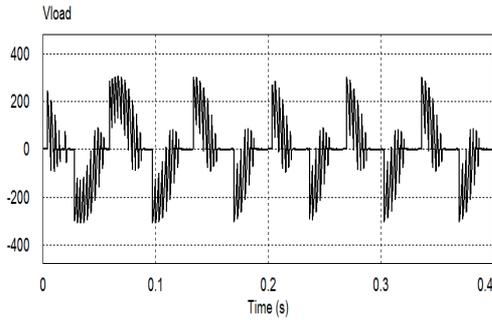


Figure 2: Output voltage of power transfer system using conventional cycloconverter

3. 상천이 필터

상천이 필터를 이용한 전압파형 개선과 고조파 감소 이론은 **Figure 3**으로 나타낼 수 있다. 입력 전압 $V_i(\omega t)$ 를 2개의 1차 측 입력으로 나누어 입력하며, 입력 전압에 위상차를 둔다. 즉, 하나는 상수 A 와 연산된 $AV_i(\omega t)$ 와 다른 하나는 위상차를 두어 B 와 연산된 $BV_i(\omega t - \theta)$ 를 입력한다. 2개의 입력은 변압을 통해 파형이 개선된 2차 측 출력 전압 $V_o(\omega t)$ 가 된다.

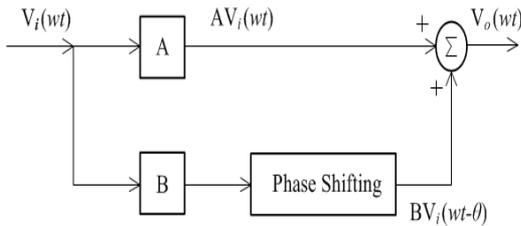


Figure 3: Block diagram of phase shifting filter.

상천이 필터의 출력을 수식으로 나타내면 **식 (1)**과 같다.

$$V_o(\omega t) = AV_i(\omega t) + BV_i(\omega t - \theta) \quad (1)$$

여기에서 $A=1$, $B=\pm 1$, $\omega = 2\pi f$ 및 $\theta = 2\pi f T_\theta$ 이고 **식 (1)**에서 상수 A 는 변압기 1차 측의 전원 입력 단에 연산되는 값으로써 “1”로 정해지며, B 는 상천

이에 의해 위상차를 두는 변압기 1차 측 다른 입력 단에 연산되는 값이며, 출력 파형의 값에 따라 “ ± 1 ”의 값을 가진다.

필터의 전이함수로서 **식 (1)**을 표현하면 **식 (2)**와 같이 나타내어진다.

$$H_f = 1 + Be^{-j2\pi f T_\theta} \quad (2)$$

$$= 1 + B\cos(2\pi f T_\theta) - jB\sin(2\pi f T_\theta)$$

또한, 전이함수의 크기와 위상 값은 **식 (3)**과 **식 (4)**와 같이 구하여진다.

$$|H_f| = \sqrt{(1 + B\cos(2\pi f T_\theta))^2 + (B\sin(2\pi f T_\theta))^2} \quad (3)$$

$$= \sqrt{1 + 2B\cos(2\pi f T_\theta) + B^2}$$

$$\angle H_f = \tan^{-1}(-B\sin(2\pi f T_\theta)/(1 + B\cos(2\pi f T_\theta))) \quad (4)$$

필터가 가산필터 타입($B=1$)인 경우에는 크기와 상응답은 다음과 같이 된다.

$$|H_f| = \sqrt{2 + 2\cos(2\pi f T_\theta)} \quad (5)$$

$$\angle H_f = \tan^{-1}(-\sin(2\pi f T_\theta)/(1 + \cos(2\pi f T_\theta))) \quad (6)$$

또한, 감쇄필터 타입($B=-1$)이면, 다음과 같이 구하여진다.

$$|H_f| = \sqrt{2 - 2\cos(2\pi f T_\theta)} \quad (7)$$

$$\angle H_f = \tan^{-1}(\sin(2\pi f T_\theta)/(1 + \cos(2\pi f T_\theta))) \quad (8)$$

두 가지 가산 및 감쇄 필터 타입에서 특정 주파수를 제거할 수 있는 상천이 정도를 구할 수 있다. 특정 주파수에서 전이함수의 크기 $|H_f| = \sqrt{2 + 2\cos(2\pi f T_\theta)}$ 가 “0”이 될 때의 T_θ 에서 “ θ ”가 상천이 각으로 결정된다.

이와 같이 필터의 입력전압 파형의 주파수 스펙트럼으로 부터 필요하지 않은 주파수를 제거할 수 있으며, 해당 주파수의 제거는 사이클로컨버터의 사리리스터의 도통각을 제어하여 상천이 필터의 천이 각을 조정함으로써 이루어진다.

상천이 필터의 입력 전압은 **Figure 4**와 같으며 각

각의 1차 측 입력 단에 위상차를 120° 로 하였을 경우이다.

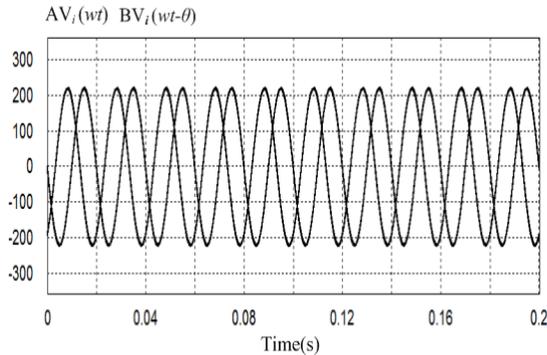


Figure 4: The waveform of input voltage by phase shifting

4. 개선된 전력변환장치

개선된 싸이클로컨버터의 전력변환장치는 상천이 필터를 컨버터의 각 출력 단에 연결한다. **Figure 5**에서 볼 수 있듯이 변압기의 1차 측에는 2개의 입력이 연결된다. 변압기 a의 1차 측 입력 중 하나는 a상의 전원이 입력되는 싸이클로컨버터의 출력이 입력되며

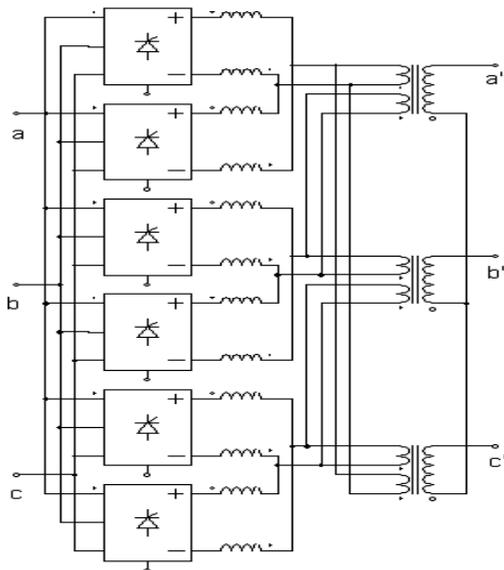


Figure 5: Power transfer system with phase shifting filter
위상차가 다른 하나의 입력은 b상의 전원이 입력되는

싸이클로컨버터의 출력이 입력되어 120° 의 위상차를 갖게 된다. 변압기 b와 c도 동일한 방식으로 컨버터의 출력을 연결하여 1차 측 2개의 입력 단에 위상차를 두게 된다. 위상차를 둔 1차 측의 입력이 2차 측으로 변압되는 과정에서 전압파형의 모양이 개선된다. 전력변환장치를 통한 출력파형은 기존의 싸이클로컨버터의 출력에 비해 보다 정현파에 가까운 파형이 되며, 그로 인해 추진전동기에 입력되는 전압에 포함되는 고조파도 크게 감소하게 된다.

Figure 6은 필터를 사용하는 개선된 전력변환장치의 싸이클로컨버터부와 제어 회로부를 나타낸 것이며 제어 회로부는 전동기의 속도 및 토크제어를 위한 주파수의 크기 및 전력소자의 스위칭 펄스 수와 펄스 폭을 제어한다. **Figure 7**은 상천이 필터부와 추진전동기를 나타낸 회로도이다. 필터부는 상천이 변압기를 사용하며, 2개의 1차 측 입력부와 1개의 2차 측 출력으로 구성된다. 부하는 현재 대형 LNG선박에서 사용하는 추진전동기를 사용하였으며 3상 유도전동기이다.

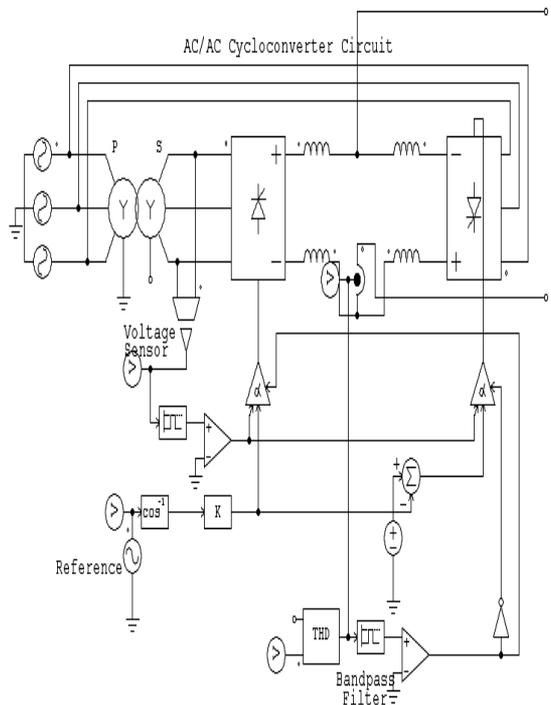


Figure 6: Cycloconverter unit of proposed power transfer system with phase shifting filter

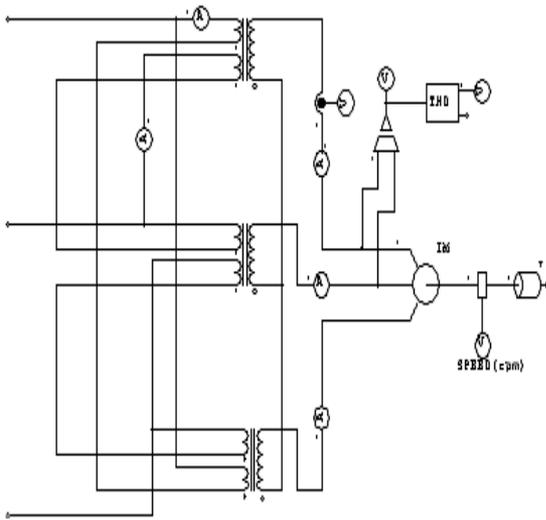


Figure 7: Phase shifting filter and propulsion motor unit

또한, 출력 전압파형의 확인과 총고조파왜형율을 측정하기 위해서 추진전동기 입력 단에 측정 장치를 설치한다.

5. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 개선된 싸이클로컨버터 전력변환장치의 유효성을 입증하기 위해 시뮬레이션을 행하였다. 시뮬레이션을 위한 환경은 현재 대형선박에 사용하고 있는 전원장치와 추진전동기를 이용하였다. 다음 **Table 1**은 시뮬레이션에 사용한 추진전동기의 특성을 나타낸 것이다. 제안된 전력변환장치의 개선정도를 알아보기 위해 기존의 싸이클로컨버터를 이용한 시뮬레이션 결과와 비교 분석하였다.

Table 1: Parameters and system constants of induction motor used for simulation

정격출력	6000[kV]	L_s	1.49[mH]
정격전압	3300[V]	R_r	0.07[Ω]
정격전류	1200[A]	L_r	0.35[mH]
극수	6	L_m	48[mH]
R_s	0.0167[Ω]	J	169[kgm ²]

속도지령은 감속기어를 사용하지 않는 직접구동방식을 사용함으로써 200[rpm]으로 설정하였다. **Figure 8**과 **Figure 9**는 필터를 사용하지 않는 기존의 싸이클로컨버터 전력변환장치를 이용하는 경우와 상전이 필터를 가지는 전기추진시스템에 대한 시뮬레이션 결과이다. 속도지령이 200[rpm]일 경우의 속도응답과 출력

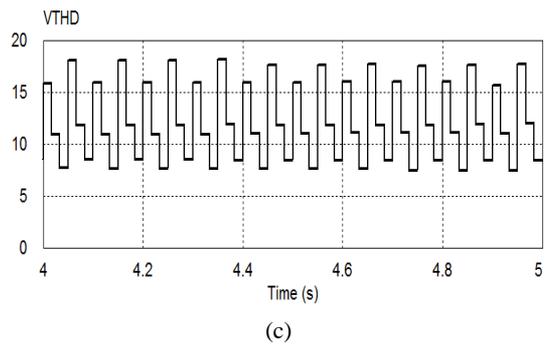
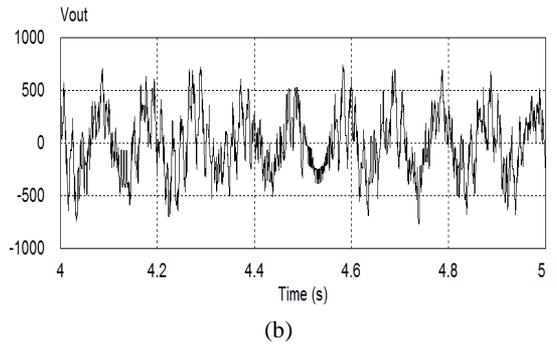
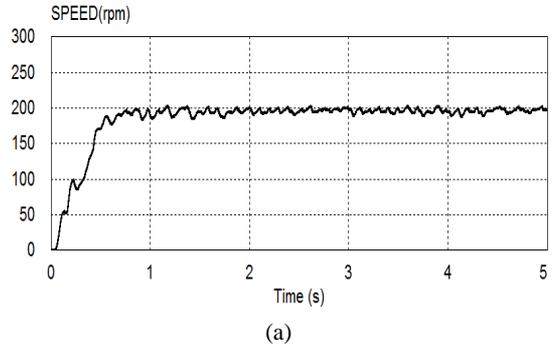


Figure 8: Simulation response without phase shifting filter; (a) speed response, (b) output voltage waveform, and (c) THD for output voltage

전압 파형 및 총고조파왜형율을 나타낸 것으로써 개선된 전력변환장치를 사용하였을 경우의 속도응답 출력이 우수하며, 전압파형도 보다 정현파에 가까운 모양임을 알 수 있다. 또한, 총고조파왜형율의 비교에 있어서도 “18” 과 “8” 로써 필터를 사용하는 경우에 크게 개선됨을 알 수 있다.

파형의 왜곡을 감소시키고 정현파에 가깝게 하여 전력의 질을 향상시킨다. 또한 기존의 컨버터에서 상수를 증가시키거나 순환모드로 사용하는 기법들에 비해 총고조파왜형율도 크게 감소하였다. 본 논문에서 제안한 방식의 개선정도를 입증하기 위해 대형선박의 실선 환경에서 시뮬레이션을 하였으며 200[rpm]의 속도지령에서 기존 방식과 비교분석한 결과에서 응답속도와 출력전압 파형이 크게 향상되었고 총고조파왜형율도 기존의 결과에 비해 상당히 감소함을 확인하였다.

참고문헌

- [1] BIN WU, High-Power Converters and AC Drives, IEEE Press/Wiley-Interscience, New York, 2006.
- [2] Stephen J. Chapman, Electric Machinery and Power System, McGraw-Hill Book Company, 2002.
- [3] David Gritter, Swarm S. Kalsi, and Nancy Henderson, "Variable speed electric drive options for electric ships", Proceedings of the IEEE Electric Ship Technologies Symposium, pp. 347-354, 2005.
- [4] S. Bernet, "Recent developments of high power converters for industry and traction applications", IEEE Trans. on Power Electron, vol. 15, pp. 1102-1117, 2000.

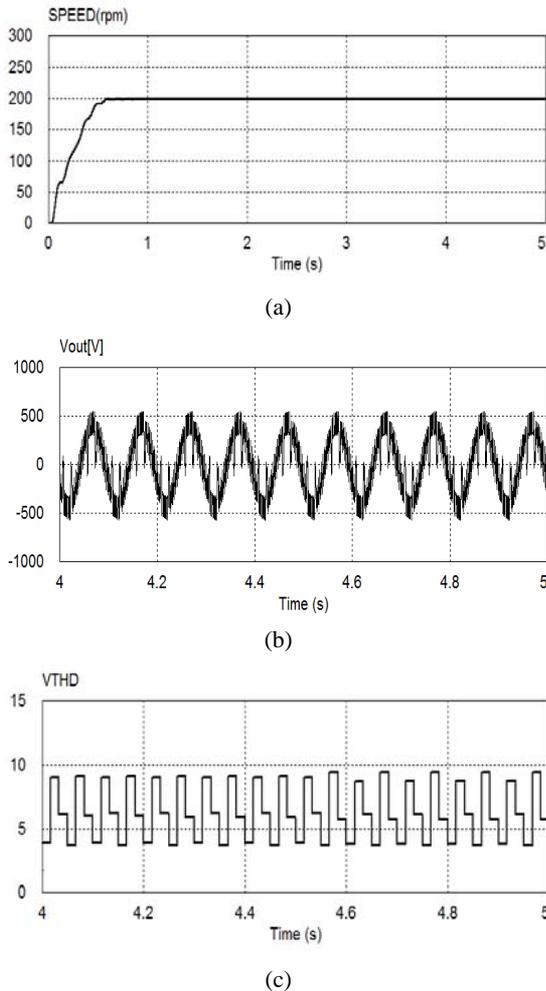


Figure 9: Simulation response with phase shifting filter; (a) speed response, (b) output voltage waveform, and (c) THD for output voltage

6. 결론

상천이 필터를 갖는 싸이클로컨버터 전력변환장치를 사용하여 최적의 상천이 각을 조정함으로써 출력전압